



ESCUELA DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TRABAJO DE GRADO  
SECTORIZACION DE ARENAS SILICEAS POR BLOQUES PARA EL AVANCE  
DE LOS FRENTE DE EXPLOTACIÓN

TITULO MINERO 2406 - COMPAÑÍA PELDAR SA.

DANIEL ÁLVAREZ RAMÍREZ

Trabajo Dirigido de Grado Presentado Como Requisito Parcial Para Optar al Título de  
Geólogo

Asesorado Por:

Dr. María Isabel Marín Cerón

Carlos Jaime Gómez Ramírez

MEDELLIN -2015

## AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecerle a mis padres, Gildardo Álvarez y Nora Ramírez, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional en una institución de alto nombre como lo es la Universidad EAFIT, por su apoyo incondicional en cada una de las etapas de formación, a mi hermana y a mi Tía Silvia Álvarez, quien han sido participe en mi crecimiento profesional en todos los aspectos y por velar como unas segundas madres por todo en mi vida personal.

Le quedo totalmente agradecido a la compañía Owens Illinois Peldar, (O-I Peldar) por permitirme realizar la etapa de práctica profesional en sus instalaciones, al Ingeniero Carlos Jaime Gómez por brindarme la confianza y el apoyo necesario para crecer en el mundo de la industria minera, y al compañero y guía inseparable Carlos Melo, también a todos y cada uno de los operarios de la Planta de Arena (Los Padrinos) y a la Ingeniera Ambiental Clara Sarmiento.

Agradecerle también al departamento de investigación de Geología de la Universidad EAFIT, principalmente, a la profesora MARIA ISABEL MARIN CERON quien desde el comienzo de mi carrera universitaria se convirtió en la guía de todo mi crecimiento académico y profesional, por tener la paciencia suficiente para ser mi asesora de proyecto de grado y por siempre brindarme la mano en los momentos que lo he necesitado, a Liliana Rendón encargada en su momento de las prácticas profesionales del departamento quien estuvo siempre pendiente de mi proceso fuera de la ciudad, a Wilton por su disponibilidad y colaboración con todos los equipos e información que necesité y a todos los compañeros de la carrera por momentos que quedaran en recuerdos como lo son Alvaro Gomez por ser ese “Parcero” incondicional, a Maria Camila Leon, Alejandra Alvarez, Yohanna Villafañez, Laura Rengifo, Laura Soto, Juan Esteban Quijano, El Rasta, Jhonca, Rossemlberg y muchas personas más que aportaron de una u otra forma un grano de arena.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| CONTENIDO .....                                 | 3  |
| 1. INTRODUCCIÓN .....                           | 7  |
| 2. OBJETIVOS .....                              | 8  |
| 2.1 Objetivo General .....                      | 8  |
| 2.2 Objetivo Especifico .....                   | 8  |
| 3. JUSTIFICACIÓN.....                           | 9  |
| 4. ASPECTOS GENERALES .....                     | 10 |
| 4.1 Localización .....                          | 10 |
| 5. MARCO GEOLÓGICO .....                        | 11 |
| 5.1 Geología Regional.....                      | 11 |
| Grupo Guadalupe .....                           | 12 |
| Formación Arenisca Dura .....                   | 12 |
| Formación Plaeners.....                         | 13 |
| Formación Labor-Tierna .....                    | 13 |
| 5.2 Geología Local .....                        | 13 |
| Formación arenisca de Labor-Tierna (Kglt) ..... | 14 |
| 5.3 Geomorfología .....                         | 16 |
| 5.4 Geología Estructural.....                   | 17 |
| 6. METODOLOGÍA.....                             | 19 |
| 6.1 Recopilación bibliográfica .....            | 19 |
| 6.2 Fase de Campo .....                         | 20 |
| 6.3 Laboratorio .....                           | 21 |
| 6.3.1 Estudio Granulométrico .....              | 21 |
| 6.3.2 Estudio Geoquímico .....                  | 22 |
| 6.3.3 Estudio Mineralógico.....                 | 22 |
| Cartografía.....                                | 23 |
| 7. ANALISIS DE RESULTADOS.....                  | 24 |
| 7.1 Síntesis geológico-estructural .....        | 24 |
| • Estructuras .....                             | 24 |

|  |    |
|--|----|
| • Diaclasas.....   | 25 |
| • Definición de bloques estructurales para la toma de muestras ..... | 28 |
| 7.2 Síntesis granulométrica .....                                    | 32 |
| 7.3 Síntesis geoquímica y Granulométrica .....                       | 33 |
| 8. DISCUSION.....  | 35 |
| 9. CONCLUSIONES .....  | 37 |
| 10. RECOMENDACIONES .....  | 38 |
| 11 BIBLIOGRAFIA .....  | 39 |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Localización general del Título Minero 2604 (Induprimas, 2012) .....  | 10 |
| Figura 2. Mapa Geológico Generalizado. (Induprimas, 2012).....  | 12 |
| Figura 3. Columna estratigráfica generalizada la Arenisca Tierna en el área del título 2604 (Induprimas, 2012) .....  | 16 |
| Figura 4. Tomografía indicando el subsuelo, el relieve y las geoformas producto de los distintos paleocanales. (Induprimas, 2012) .....                                     | 17 |
| Figura 5. Perfil del flanco occidental del Anticlinal de Nemocón donde se encuentra ubicado el título 2604 (Induprimas, 2012) .....   | 18 |
| Figura 6. Ubicación de Mina Vieja (Modificado de Induprimas, 2012).....   | 20 |
| Figura 7. Flujodiagrama metodológico de laboratorio .....   | 21 |
| Figura 8. Equipo utilizado para el análisis de contenido férrico en arenas. A. Cuarteador tipo Jones, B. Prensa y Molino de ágata, C. Balanza Analítica, D. Minipal 4 ..... | 22 |
| Figura 9. Mapa con ubicación de Frente Cárdenas, Cristalería y Tajo-02 en el área del título minero 2406.....   | 24 |
| Figura 10. Esquema de deformación de un anticlinal con la formación de diaclasas en la zona de distensión. (George & Stephen, 1996) (Gonzales L. , 2002).....               | 25 |
| Figura 11. A) Mapa geológico generalizado B) Escarpe de falla. (Induprimas, 2012) .....   | 25 |
| Figura 12. Diagramas de rosas de los distintos frentes de explotación.....  | 26 |
| Figura 13. Mapa con ubicación y clasificación del macizo rocoso según Gonzales L (2002). .....  | 27 |
| Figura 14. A) Mapa con cartografía de las principales diaclasas. B) Tajo-02 con la definición de bloques y valores de contenido férrico.....                                | 28 |
| Figura 15. A) Mapa con cartografía de las principales diaclasas. B) frente Sur Tajo-02 indicando las principales diaclasas.....   | 29 |
| Figura 16. A) Mapa con cartografía de las principales diaclasas. B) frente Mina Nueva con la definición de bloques y valores de contenido férrico.....                      | 30 |
| Figura 17. A) Mapa del frente Cárdenas con cartografía de las principales diaclasas.....  | 31 |

## **Lista de Tablas**

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Recopilación bibliográfica seleccionada con sus principales aspectos.....                                    | 19 |
| Tabla 2. Clasificación de diaclasas según el número de familias .....   | 27 |
| Tabla 3. Descripción de la continuidad (Gonzales L. , 2002).....  | 27 |
| Tabla 4. Resultados granulométricos de la muestra después de ser sometida a tamizaje .....                            | 32 |
| Tabla 5. Minerales identificados con su respectiva densidad específica (Dana, 1855) .....                             | 33 |
| Tabla 6. Resultados posteriores a la separación por medios densos. ....   | 34 |
| Tabla 7. Minerales pesados contaminantes de arenas usadas en la fabricación de vidrio (Fernandez Navarro, 2003). .... | 36 |

## 1. INTRODUCCIÓN

En el título con registro minero 2604 donde se encuentra la Mina el Tunal, INDUPRIMAS S.A.S. se han extraído arenas silíceas de dos frentes de explotación conocidos como Mina Vieja y Mina Nueva, de los cuales se beneficia la Cristalería Peldar S.A.

El vidrio es un material artificial o incluso natural que se obtiene por enfriamiento a una velocidad determinada de una mezcla de componentes, ya sean de tipo inorgánico fundida o bien en el enfriamiento de ciertas rocas fundidas. Desde el punto de vista industrial se logra por el segundo procedimiento, Además de los diversos métodos de moldeado y la amplia variedad de materiales con múltiples usos en la vida ordinaria como: construcción, industria, tecnología, investigación entre otros. (Fernandez Navarro, 2003).

Las arenas silíceas son la principal materia prima utilizada en la elaboración de vidrio en cualquiera de sus presentaciones, para la empresa O-I Peldar es de vital importancia la calidad química y física del material extraído en la mina El Tunal de INDUPRIMAS S.A.S, por esta razón se hace necesaria la realización de una caracterización detallada tanto geológica como estructural y geoquímica del área de estudio, con el fin de garantizar que las arenas explotadas presenten la calidad necesaria para la fabricación de sus productos.

En la fabricación de vidrio se extraen dos tipos de arenas silíceas clasificadas según su contenido de hierro, conocidas como: (1) arena común (0.060% FeO) y (2) arena para cristalería (0.021% FeO), siendo la segunda la más pura en cuanto a su contenido en sílice. El hierro como elemento le da una tonalidad verde al vidrio, por esta razón, y principalmente en la arena para cristalería, se considera un contaminante ya que este vidrio debe ser lo más incoloro posible.

El objetivo del presente proyecto es la sectorización por bloques para el avance de los frentes de explotación en arenas silíceas, en el título minero 2406 de la compañía Peldar SA. Con el fin de identificar los bloques que cumplan con las características mineralógicas y geoquímicas necesarias para planear el avance de la explotación en el corto plazo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Levantamiento geológico-estructural y geoquímico detallado de los frentes de explotación, con el fin de sectorizar por bloques el potencial económico en cuanto a la calidad de las arenas del título minero, en este caso específico de la Mina El Tunal..

### **2.2 Objetivo Especifico**

- Recopilación bibliográfica.
- Levantamiento y actualización de la geología en los frentes de explotación.
- Cartografía e identificación de los principales rasgos estructurales de los frentes.
- Identificación de contaminantes mediante el análisis estructural y geoquímico.
- Delimitación de los bloques en términos de calidad para el muestreo.
- Evaluación de los bloques delimitados en términos de la calidad de las arenas para su explotación.



### 3. JUSTIFICACIÓN

El sílice es el principal constituyente (componente) para la fabricación de vidrio, por esta razón se hace necesario mantener un control sobre la calidad de las materias primas que se encuentran en extracción en el título minero 2604 perteneciente a la mina El Tunal, ya que el principal criterio para el uso de una roca silícea en la formulación de un vidrio industrial es su riqueza en  $\text{SiO}_2$ , que debe ser al menos de un 99,5-98,5 %, pudiéndose mejorar con adiciones de feldespatos o caolín, pero siempre sin superar el 0,1-0,5 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en la composición del baño fundido. El aporte de sílice a la composición vítrea siempre se ha realizado por la adición de arenas de cuarzo en su elaboración, aunque no queda excluido el aporte de este formador de red con la adición de minerales más complejos como el uso de cuarcitas; pero en cualquier caso, la arena es la materia prima básica para la obtención de la mayor parte de los vidrios. (Rincon, 2005)

Es de tal importancia el uso de la arena silícea en la producción de vidrios que el mercado de esta materia prima en el mundo comprende un 18% para la fabricación de vidrio plano y un 39% para la fabricación de "vidrio hueco" o de botellas. (Rincon, 2005).

En el caso de la Mina El Tunal, se hace la extracción de arenas silíceas sobre las rocas del Grupo Guadalupe, específicamente de la Formación Labor-Tierna, pero aún se desconoce la variabilidad de la calidad de dichas arenas, principalmente, en términos del contenido de hierro, los minerales aportantes de dichas impurezas y el control estructural (patrones de diaclasamiento) que podría estar jugando un papel muy importante en el proceso de contaminación de dichos materiales.

Teniendo en cuenta lo anterior, se identificó como objetivo general hacer el levantamiento geológico-estructural y geoquímico detallado de los frentes de explotación, con el fin de sectorizar por bloques el potencial económico en cuanto a la calidad de las arenas del título minero, en este caso específico de la Mina El Tunal.

## 4. ASPECTOS GENERALES

### 4.1 Localización

El área de estudio se localiza en la mina el Tunal sobre el Título con registro Minero 2604, cuyo titular es Induprimas S.A.S. con un área de 984Ha, se encuentra entre los municipios de Zipaquirá, Tocancipá, Cogua, Nemocón y Gachancipá en el departamento de Cundinamarca. (Figura 1).

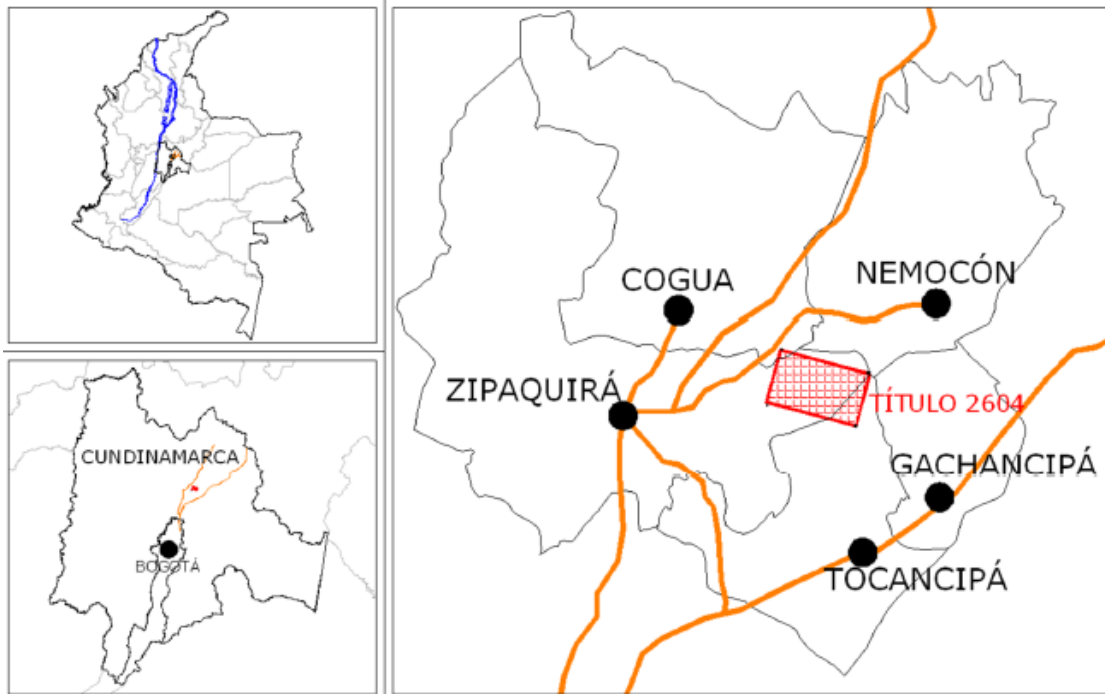


Figura 1: Localización general del Título Minero 2604 (Induprimas, 2012)

## 5. MARCO GEOLÓGICO

### 5.1 Geología Regional

La Sabana de Bogotá está localizada en la parte central de la Cordillera Oriental y en ella afloran rocas desde el Cretácico Superior al Cuaternario las cuales evidencian diferentes condiciones de sedimentación. Las rocas más antiguas están representadas en las formaciones Chipaque, La Frontera, Simijaca y Conejo (Turoniano-Santoniano); ésta sedimentación se dio en ambientes marinos con la depositación de 1.200 m aproximados de secuencia. A partir del Campaniano las condiciones de sedimentación varían y se deposita en zonas distales la Formación Lidita Superior, y la Formación Arenisca Dura en zonas proximales y continúa la sedimentación en el Campaniano Superior con la Formación Plaeners; la regresión se completa y deja como último registro marino la Formación Labor-Tierna y la parte inferior de la Formación Guaduas y empieza una sedimentación continental de tipo fluvial. (Montoya & Reyes, 2005).

El altiplano Cundiboyacense en general se encuentra afectado por una secuencia de pliegues paralelos relacionados con la evolución tectónica de la cordillera oriental, al norte del departamento de Cundinamarca en general la tendencia del plegamiento es en dirección Norte-Oriente asociado a los posibles esfuerzos en el desarrollo del geosinclinal de la cordillera oriental. (Posada, 1995)

Las principales fallas a nivel regional (Nemocon) son de tipo inverso, asociadas en general a los fenómenos compresivos que dieron origen a los principales plegamientos de la Cordillera Oriental.

El área de estudio se localiza sobre el flanco occidental del anticlinal de Nemocón, sector Sur como se observa en la figura 2. En el centro de este anticlinal afloran las formaciones Arenisca Dura y Conejo, y en los flanco las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor-Tierna, todas estas pertenecientes al Grupo Guadalupe.

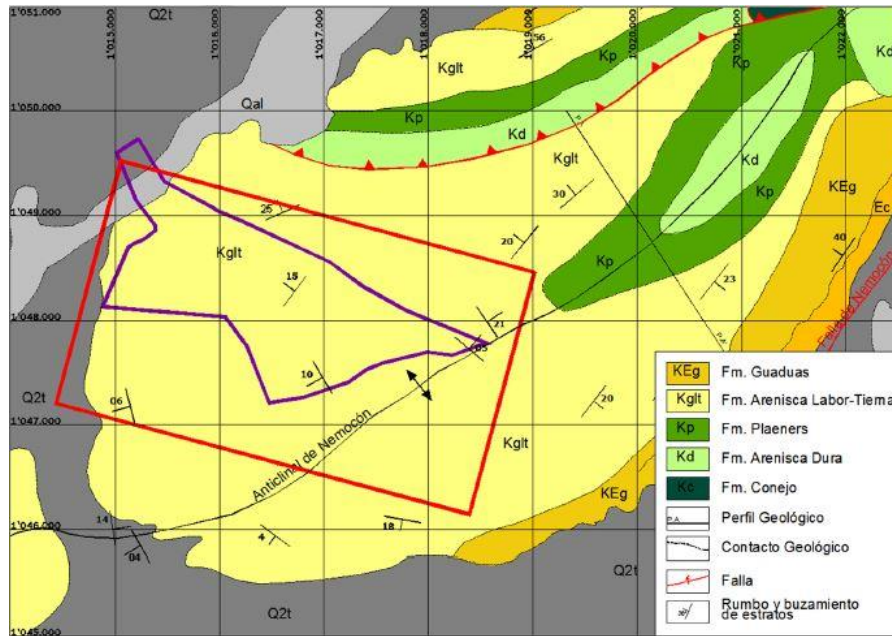


Figura 2. Mapa Geológico Generalizado. (Induprimas, 2012)

### Grupo Guadalupe

Definido en los cerros orientales de Bogotá, está conformado por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca de Labor-Tierna, en general, presenta cambios faciales y de espesores. (Montoya & Reyes, 2003)

### Formación Arenisca Dura

Según Pérez & Salazar (1978), se proponen este nombre a la unidad litológica que reposa concordantemente y transicionalmente sobre una sucesión monótona de lutitas fisiles y grises de la Formación Chipaque y que es suprayacida por una secuencia de arcillolitas, arcillolitas silíceas y liditas de la Formación Plaeners. La sección tipo se localiza en el cerro El Cable (oriente de Bogotá), con un espesor de 449 m, subdividida en ocho conjuntos constituidos por areniscas, en un 63,8% y un 36,2% de limolitas, arcillolitas y liditas.

La Formación Arenisca Dura se depositó en un ambiente de plataforma marina interior a media durante una fase regresiva del mar. Dentro de esta plataforma la variación de facies arenosas totalmente bioturbadas a facies laminadas sugieren una fluctuación de depósito desde el upper offshore, a la zona de transición y el lower shoreface (Perez & Salazar, 1978).

Dentro del proceso regresivo se observan oscilaciones del nivel del mar que dan a lugar a las capas silíceas que fueron depositadas en un mar de aguas tranquilas por debajo de la acción de las olas en una plataforma externa. En los segmentos arenosos se presentan

laminación flaser y lenticular determinando una influencia del oleaje durante el depósito en una plataforma interior. (Montoya & Reyes, 2003)

Edad: Campaniano Inferior.

### **Formación Plaeners**

Nombre propuesto formalmente por (Perez & Salazar, 1978) para la unidad litoestratigráfica que reposa concordantemente sobre la Formación Arenisca Dura y suprayace a la Formación Arenisca de Labor; en la sección tipo presenta un espesor de 73 m, está representada por arcillolitas, liditas, limolitas y en menor proporción areniscas de grano muy fino.

La Formación Plaeners se depositó en un ambiente de plataforma externa a media, por debajo de la acción de las olas, con un aporte importante de sílice que puede indicar corrientes de surgencia favoreciendo el desarrollo de fauna. (Montoya & Reyes, 2003)

Edad: Campaniano Superior

### **Formación Labor-Tierna**

Las Formaciones Arenisca de Labor, Arenisca Tierna y el segmento que los separa, se agrupan como una sola unidad cartográfica dada la similitud litológica y su expresión morfológica, se establece desde el techo de la Formación Plaeners hasta la base de la Formación Guaduas. (Montoya & Reyes, 2005)

(Perez & Salazar, 1978) Al oriente de Bogotá, formalizaron a las Formaciones Arenisca de Labor y Arenisca Tierna. La Arenisca de Labor, presenta un espesor de 177 m, comienza con capas muy gruesas de areniscas que se intercalan con capas muy delgadas de arcillolitas. La Formación Arenisca de Labor es separada de la Formación Arenisca Tierna por 19 m de lodolitas y arcillolitas; la Arenisca Tierna con un espesor de 49 m, se diferencia de la Labor por presentar capas muy gruesas de areniscas de tamaño más grueso.

La Formación Arenisca Labor-Tierna se depositó en un ambiente marino somero litoral; la Arenisca de Labor (segmento A) presenta ambientes menos litorales y se sitúa en una plataforma interna y media que indican un proceso de somerización desde la Formación Plaeners hacia la Arenisca Tierna la cual marca el fin de la regresión marina presentando fases depositadas en frentes de playa e islas barrera. (Montoya & Reyes, 2003)

## **5.2 Geología Local**

Dentro del área del Título minero 2604 afloran formaciones de edad Cretácica y Cuaternaria, como Cuaternario se destacan los rellenos de material orgánico con un espesor promedio que varía entre 0.5 y 3 metros, aunque en zonas deprimidas o antiguos canales de erosión se presentan sectores con suelos arcillo-arenosos producto del lavado de las arenas de la parte superior de la mina. Como parte del Cretáceo se distingue la Formación

Arenisca de Labor – Tierna perteneciente a la parte superior del Grupo Guadalupe (Induprimas, 2012).

### **Formación arenisca de Labor-Tierna (Kglt)**

La formación arenisca labor está separada de la formación arenisca tierna por 19m de lodolitas y arcillolitas; la arenisca tierna con un espesor de 49m, se diferencia de la Labor por presentar capas muy gruesas de areniscas de tamaño más grueso (Perez & Salazar, 1978).

En el área de la mina aflora el nivel de Arenisca Tierna, que está compuesto por cuarzoareniscas friables o muy friables de color crema-blanco, con matriz arcillosa (3%) y cemento silíceo en proporciones variables (3-5% y 10-15%), el tamaño de grano es muy fino a fino, la redondez varía desde elongados a subesféricos, los contornos son angulares a subangulares, tienen buena selección y los contactos son tangenciales; texturalmente se clasifican como areniscas maduras. (Montoya & Reyes, 2005)

Dentro del área del Título 2604 el Nivel de Arenisca Tierna se dividió informalmente en dos niveles, Nivel Superior (Kglt-SUP) y Nivel Inferior (Kglt-INF), separados por capas de arcillolitas abigarradas de hasta 2 metros de espesor. (Induprimas, 2012)

- **Nivel Superior (Kglt-SUP):** Compuesto principalmente por bancos de cuarzoareniscas de 1 a 3 metros de espesor, de grano fino a medio, subangular a subredondeado, bien seleccionada, de color blanco a gris claro con ocasionales niveles de color amarillo que pueden estar relacionados con la presencia de óxidos. Intercalados con los bancos de arenisca se encuentran láminas de arcillolita de color gris claro. Este nivel se encuentra aflorando y en explotación en la Mina Nueva, el espesor promedio medido en afloramiento y en perforaciones es de 25.0 a 29.0 metros aproximadamente.
- **Nivel Inferior (Kglt-INF):** Compuesto por bancos de 1 a 5 metros de espesor de cuarzoareniscas de grano fino a medio, subangular a subredondeado, bien seleccionada, de color amarillo claro, que varía a amarillo oscuro y gris claro, algunos sectores presentan costras de oxidación asociadas principalmente a planos de diaclasas; a gran escala presenta estratificación cruzada. Separando los bancos de arenisca se encuentran niveles de arcillolita de color gris claro, estos varían de espesor desde unos pocos milímetros hasta 0.5 metros aproximadamente.

Este nivel se encuentra aflorando y actualmente en explotación en Mina Vieja, el espesor medido en afloramiento y en las perforaciones varía entre 28.0 y 35.0 metros. En este nivel se encuentran desde areniscas friables hasta areniscas con dureza moderada. En general, en Mina Vieja la arenisca es friable, sin embargo, en algunos sectores la dureza aumenta y no permite su explotación por medio del ripper, por lo que es necesario emplear explosivos.

- **Nivel Indiferenciado (Kgtl-IND):** Infrayaciendo el Nivel Inferior se encuentra una secuencia bancos de arenisca con láminas y/o capas de arcillolita abigarrada. Las areniscas son cuarzosas, de grano fino a muy fino, subangular a subredondeado, de color gris claro a habano, de dureza media a alta, dura y compacta debido al cemento silíceo que une los granos, presenta estratificación gruesa a delgada. Se encuentra aflorando en los escarpes que delimitan el canal que transporta la arena hacia la planta de lavado, al Norte de Mina Vieja.
- **Cuaternario (Q):** Se presenta en una serie de depósitos arcillo-arenosos que, en general, rellenan los valles de las depresiones secas, estas depresiones tienen una dirección aproximada NE-SW, y alcanzan profundidades entre los 10 y los 30 metros. Al parecer estos rellenos se encuentran relacionados con zonas de debilidad del macizo rocoso asociadas a la existencia de diaclasas.

A continuación se presenta la figura 3, mostrando la disposición de los estratos con sus características en la columna estratigráfica generalizada del área del título minero 2604 realizada por Rocas y Minerales.



| UNIDAD                    | NIVEL                           | PROF. | LITOLOGIA | OBSERVACIONES   |
|---------------------------|---------------------------------|-------|-----------|---|
| FORMACIÓN ARENISCA TIERNA | NIVEL SUPERIOR (Kglt-SUP)       | 28 m  |           | Nivel compuesto principalmente por bancos de cuarzoareniscas de 1 a 3 metros de espesor, de grano fino a medio, subangular a subredondeado, bien seleccionada, de color blanco a gris claro, con ocasionales niveles de color amarillo claro que pueden estar relacionados con la presencia de óxidos; con estratificación cruzada. |
|                           |                                 | 2m    |           | Arcillolitas abigarradas con pequeñas intercalaciones de láminas de arena, su espesor varía entre 1.5 a 2.0 m.  |
|                           | NIVEL INFERIOR (Kglt-INF)       | 35m   |           | Nivel compuesto por bancos de cuarzoareniscas de 1 a 5 metros de espesor, de grano fino a medio, subangular a subredondeado, bien seleccionada, de color amarillo claro, que varía a amarillo oscuro y gris claro.  |
|                           |                                 | 1m    |           | Arcillolitas abigarradas con pequeñas interdigitaciones de arenisca de color gris claro.  |
|                           | NIVEL INDIFERENCIADO (Kglt-IND) | 20m   |           | Secuencia de bancos de arenisca con láminas de y/o capas de arcillolitas abigarradas. Areniscas cuarzosas, de grano fino a muy fino, subangular a subredondeado, de color gris claro a habano, de dureza media a alta, dura y compacto debido al cemento silíceo, presenta estratificación gruesa a delgada.                        |

Figura 3. Columna estratigráfica generalizada la Arenisca Tierna en el área del título 2604 (Induprimas, 2012)

### 5.3 Geomorfología

La geomorfología del área está controlada por eventos tectónicos y erosivos evidenciados en los escarpes que se presentan en la zona norte del título minero, estos pueden considerarse evidencia de fallas asociadas a bloques levantados donde se pueden observar taludes verticales de más de 30 metros de altura.

Estudios realizados por Álvarez (1985) para calcular espesores de descapote, determina que las depresiones sobre la Arenisca Tierna corresponden con los sitios donde hay mayor espesor de capa vegetal y arcilla, a lo largo de los planos de diaclasamiento abiertos sobre la Arenisca Tierna, por acción de los agentes meteóricos como las aguas de escorrentía e infiltración, posiblemente provenientes de deshielo glaciar que se encontró a más de 3500



m.s.n.m., que ayudaron a erosionar las capas superiores más deleznable a lo largo de las diaclasas produciendo así depresiones abiertas y cerradas sobre el terreno.

En general la geoforma dominante en el área son colinas bajas a medias con pendientes suaves, de acuerdo con el levantamiento de campo realizado en el presente proyecto, el anticlinal de Nemocón, presenta buzamientos de  $12^\circ$ , exceptuando los escarpes.

Como se observa en la tomografía realizada por Induprimas (2012) (Ver figura 4), se pueden apreciar en las tonalidades azules la baja resistencia eléctrica de las litologías arcillosas, las cuales se pueden interpretar como antiguos canales, en tonalidades rojas, naranja y verde se aprecian colinas suaves asociadas a litologías con mayor resistencia eléctrica, donde la roca es más compacta.

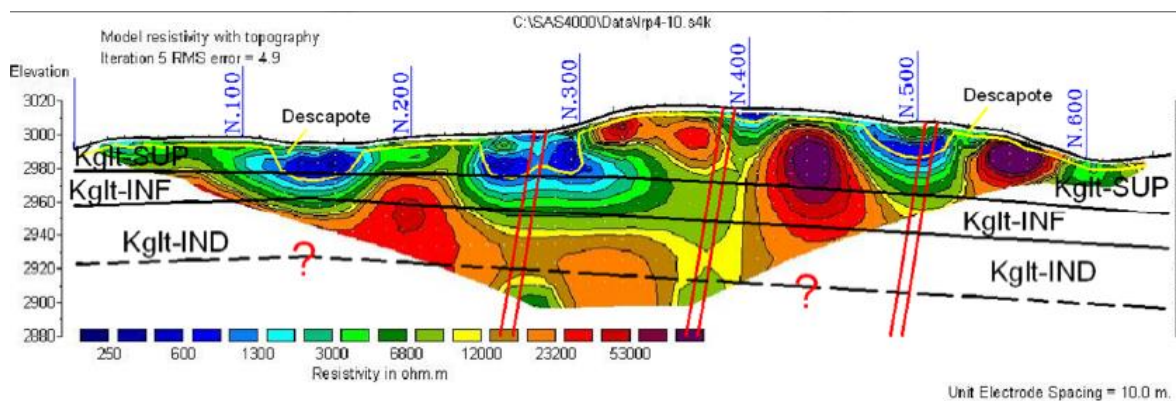


Figura 4. Tomografía indicando el subsuelo, el relieve y las geoformas producto de los distintos paleocanales. (Induprimas, 2012)

#### 5.4 Geología Estructural

El área del Título Minero se encuentra localizado en el flanco occidental del Anticlinal de Nemocón cuyo cierre sur está expresado en el cambio de rumbo de los estratos de la Formación Arenisca de Labor-Tierna. De esta manera la orientación predominante en los estratos del sector de Mina Vieja es N-S/10W, mientras que en el sector de Mina Nueva es N30W/10SW. El yacimiento se encuentra delimitado hacia el Norte por la Falla El Tunal, que tiene una orientación N79W/75SW. Hacia el sur de esta falla, las rocas de la Fm. Arenisca de Labor-Tierna se encuentran afectadas por una gran cantidad de diaclasas que poseen una orientación similar. Ver Figura 5. (Induprimas, 2012)

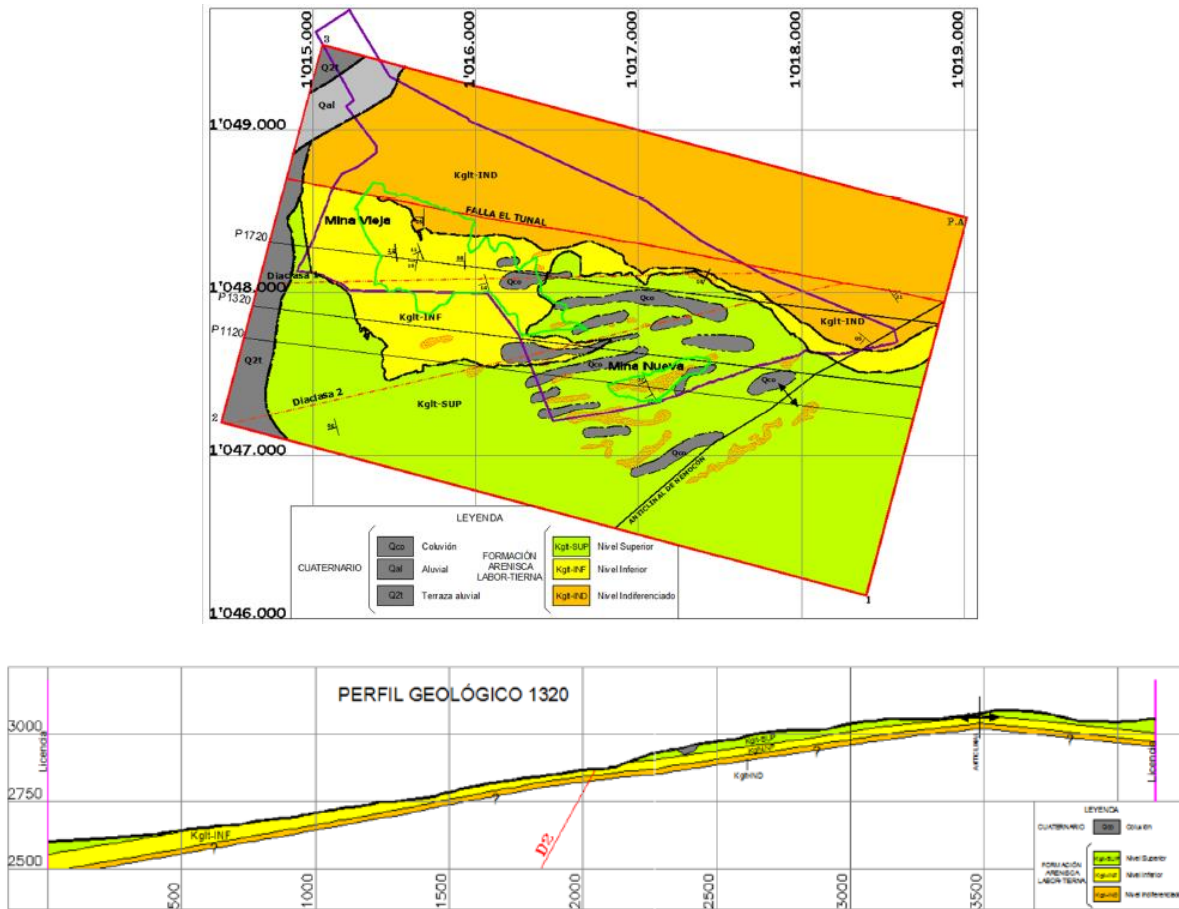


Figura 5. Perfil del flanco occidental del Anticlinal de Nemocón donde se encuentra ubicado el título 2604 (Induprimas, 2012)

El eje axial de este anticlinal es aproximadamente de N45E inclinado hacia el S-W. Las variaciones en el buzamiento de la estratificación, podrían estar asociadas a plegamientos o fallas asociadas, siendo esta última la más probable (Alvarez, 1985).

En el área se tienen cuatro sistemas de diaclasas principales con direcciones N65W/85N, N30E/75E, N85E/85N y N20E/19S; el sistema de diaclasamiento N65W puede corresponder al diaclasamiento tensional asociado a plegamientos. En algunos sitios del área de concesión se tiene la evidencia de eventos compresionales como diaclasas y fracturas asociadas las cuales pueden ser derivadas de los esfuerzos mayores en el momento de la deformación. (Posada, 1995). Cerca al título se encuentra la falla de Nemocón, la cual es de tipo inverso con movimiento transversal, situada en la parte nororiental del área; se extiende desde la quebrada Colón hasta el municipio de Suesca, paralela al anticlinal de Nemocón. (Gonzales L. , 2002) la dirección es aproximadamente SW-NE con un buzamiento de 45°.

## 6. METODOLOGÍA

El presente proyecto se desarrolló siguiendo las siguientes etapas metodológicas: (1) Recopilación bibliográfica; (2) Fase de campo; (3) Etapa de laboratorio y (4) Sectorización por frentes de explotación.

### 6.1 Recopilación bibliográfica

En esta etapa se revisaron los estudios anteriormente realizados sobre el área de la mina El Tunal con el fin de encontrar rasgos importantes y de interés para una futura exploración y explotación de arenas silíceas, los principales informes y documentos a tener en cuenta son los realizados por la consultora ROCAS Y MINERALES contratada por INDUPRIMAS S.A.S. para el estudio geológico de la mina. En la siguiente tabla resumen se mencionan los principales estudios y los aspectos a resaltar de cada uno.

| Recopilacion Bibliografica  |   |
|---|---|
| Nombre  | Aspectos Importantes  |
| "Plan de Trabajos y Obras, Título minero 2604, Zipaquirá-Cundinamarca" RYM_370_Informe Final del año 2012.  | Desarrollo de la mina a corto y largo plazo.  |
| "Zonificación mina de arena silícea- Zipaquirá, Estudio geológico-minero del sector alto", Igetec S.A. 1994. (Variación óxidos de hierro según la profundidad y las varillas analizadas, porcentaje de minerales)                             | Variación de óxidos de hierro en profundidad por medio de perforaciones con varillas de 3 a 12m.                          |
| "Prospección tomográfica para delimitar y medir el espesor del contacto estéril-arena en los tajos 01 y 06 de la mina el tunal. Zipaquirá Cundinamarca" RYM_382_informe final 2013. (Profundidad de contactos, resistencia de los materiales) | Registros eléctricos mostrando la resistencia y la profundidad de los contactos arena-arcilla con formas de paleocanales. |
| "Estudio de fracturamiento de la mina de arena silícea en Zipaquirá" Ing. Rafal Duarte Gandica 1990 (direcciones predominantes de diaclasas)  | Direcciones preferenciales de diaclasamiento en el área de la mina  |
| Geología Superficial del sector alto de la mina de arena silícea- Zipaquirá, Informe Final. T.D.L. LTDA. 1996 (fotografías de diaclasas, cartografía)   | Forma y dirección de las principales diaclasas en la parte alta de la mina  |
| "Plancha Geológica 209 Zipaquirá y memoria del Servicio Geológico Colombiano"   | Información general del área del título minero 2604   |
| "Caracterización de un yacimiento de arena silícea para cristalería ubicado en el área de concesión No.2604 de la compañía Peldar S.A. Zipaquirá" Jaime Posada Castaño, Universidad EAFIT 1995.   | características de las arenas extraídas por INDUPRIMAS SAS  |

Tabla 1. Recopilación bibliográfica seleccionada con sus principales aspectos.

Al revisar estos informes se consolidó una base de datos con los datos estructurales que muestran direcciones preferenciales de diaclasamiento, perforaciones, tomografías y

estudios por agencias nacionales que hablan del paleoambiente y la estructura general del anticlinal de Nemocón.

## 6.2 Fase de Campo

La fase de campo se dividió en dos etapas, la primera se desarrolla en el área conocida como Mina Vieja que pertenece al denominado nivel inferior de la Arenisca Tierna, conformado por cuarzoareniscas de grano fino, color amarillo claro a gris claro con un espesor total de 35 metros. En esta se encuentran antiguos frentes de explotación donde es posible observar la litología y diferentes estructuras.

Los lugares conocidos como zona de retrolleado, frente Cárdenas, La Campiña y Frente Voladura representan los antiguos frentes de extracción donde fue posible realizar el levantamiento geológico para identificar el régimen estructural y la litología predominante en el área.

De la información obtenida en esta etapa, se planeó una segunda etapa de campo cuyo trabajo se focalizó en visitar los frentes activos para comparar los datos con los anteriormente tomados y así realizar la actualización de la cartografía, principalmente de los frentes activos con el fin de planificar a corto, mediano y largo plazo el direccionamiento de la extracción de la materia prima.

Metodológicamente se recolectaron muestras de 2,5 Kg de cada uno de los frentes activos dentro de los bloques definidos por las principales diaclasas y la toma de datos se realiza a partir de brújula Brunton estructural, GPS Garmin, Decámetro, cámara fotográfica y martillo.

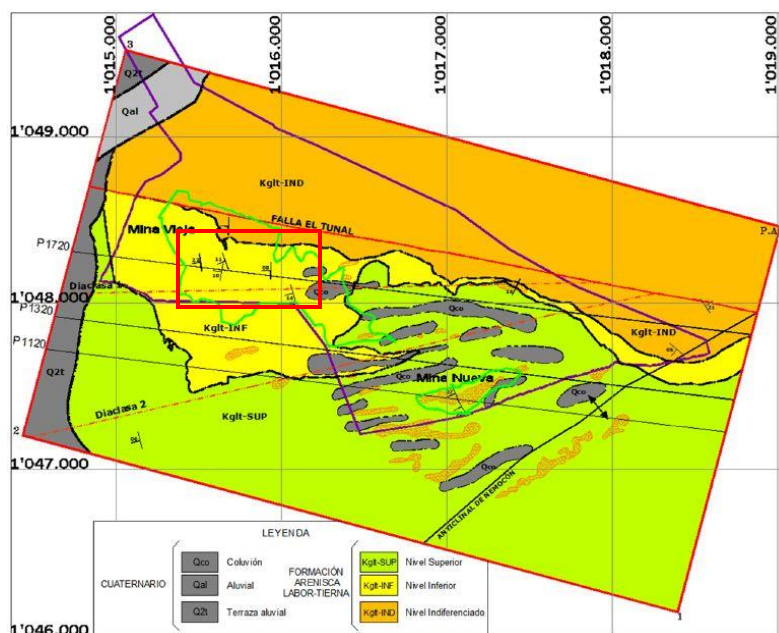


Figura 6. Ubicación de Mina Vieja (Modificado de Induprimas, 2012)

### 6.3 Laboratorio

Se realiza el análisis de calidad de las muestras de arena extraídas en los distintos frentes de explotación para la caracterización geoquímica, teniendo en cuenta las estructuras medidas con el fin de desarrollar mapas con la dirección del diaclasamiento y con valores de las arenas para concluir con el diseño de bloques para muestreo con la mejor dirección de avance en los frentes.

Para el análisis químico de las muestras se utilizó el laboratorio de la compañía Cristalería Peldar SAS, en este se puede llevar a escala el proceso de la planta de arena que consta de la simulación de las distintas fases de lavado y secado.

La caracterización geoquímica y mineralógica tiene como fin identificar los minerales férricos que contaminan las arenas para buscar implementar un método en el proceso de lavado que permita eliminarlos.

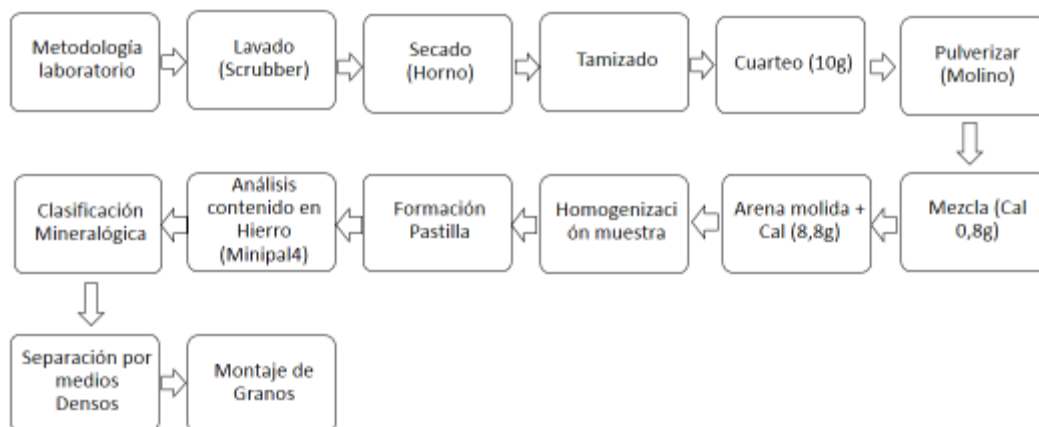


Figura 7. Flujodiagrama metodológico de laboratorio

A continuación se presenta una breve explicación de algunas de las etapas a las que es sometida la muestra de arena durante el análisis en laboratorio.

#### 6.3.1 Estudio Granulométrico

El estudio granulométrico consiste en obtener la distribución de la arena por tamaños donde se emplean tamices normalizados y numerados dispuestos en orden decreciente, mallas 20, 30, 40, 50, 100, 140, -140. Este nos indica si el tamaño de grano que domina en el área es apto para el proceso de elaboración del vidrio. El contenido en partículas muy finas « 0,1 mm) debe ser menor del 1 %, ya que si se aumenta esta proporción puede ocurrir que el



afinado o eliminación de burbujas presente mayores dificultades. Por otro lado, los granos muy gruesos de arena pueden dar lugar a la presencia de "infundidos" en el vidrio final.

### 6.3.2 Estudio Geoquímico

El estudio geoquímico consiste en obtener el porcentaje de los elementos que constituyen las arenas, tanto como sílice y sus contaminantes, en nuestro caso el equipo se encuentra calibrado para obtener con mayor precisión el contenido en FeO.



Figura 8. Equipo utilizado para el análisis de contenido férrico en arenas. A. Cuarteador tipo Jones, B. Prensa y Molino de ágata, C. Balanza Analítica, D. Minipal 4

### 6.3.3 Estudio Mineralógico

El estudio mineralógico consiste en clasificar los minerales que constituyen la arena silíceas, este proceso se divide en dos partes, diferenciación de minerales densos y montaje de granos con caracterización de estos.

Para la diferenciación se utiliza el químico Tetrabromoetano, el cual presenta una densidad específica y apropiada para que el mineral de cuarzo, menos denso, quede suspendido en el fluido mientras los minerales densos se precipitan al fondo del envase, óxidos de hierro.

- **Separación por medios densos**

Se escogen las muestras más relevantes después de pasar por el proceso de tamizado y para realizar la separación de densos por medio del químico Tetrabromoetano, se utilizan 3 beaker de laboratorio donde se vierten 150ml de la solución, posteriormente se agrega

15,5g de arena para cristalería donde los minerales menos densos quedan suspendidos en el fluido y los más densos se precipitan, esto para lograr separar el cuarzo de los minerales contaminantes, luego se filtra el líquido en papel filtro el cual permite el paso del químico reteniendo los minerales densos, se seca el papel filtro y posteriormente se realizara el montaje de granos y se analiza bajo estereoscopio para reconocer cuales son los minerales densos que aportan las impurezas, principalmente de hierro, y así clasificarlos para aplicar el mejor procedimiento con el fin de que estos sean retirados en el proceso de lavado y obtener la mayor pureza posible en las arenas.

### **Cartografía**

Se realizó la actualización de la cartografía existente con los datos tomados en campo con el fin de entender el régimen estructural y la geometría de los frentes de explotación para poder diseñar bloques de muestreo y posterior extracción del material.

La actualización de la cartografía se realiza sobre la última actualización topográfica realizada por rocas y minerales en escala 1:10.000.

## 7. ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos en los análisis de contenido férrico en los distintos frentes, se identificaron las arenas con mejor calidad y se clasificaron como óptimas para cristalería. Adicionalmente, se realizó la caracterización estructural y se determinaron distintos bloques demarcados por las principales diaclasas. Basándose en el valor del contenido férrico se especifican cuáles son los bloques que se consideran con alto potencial minero y los que no presentan la calidad necesaria fueron calificados como arena de tipo común. La caracterización se realizó en las zonas conocidas como Frente Cárdenas, Frente Cristalería (Mina Nueva) y Tajo-02.

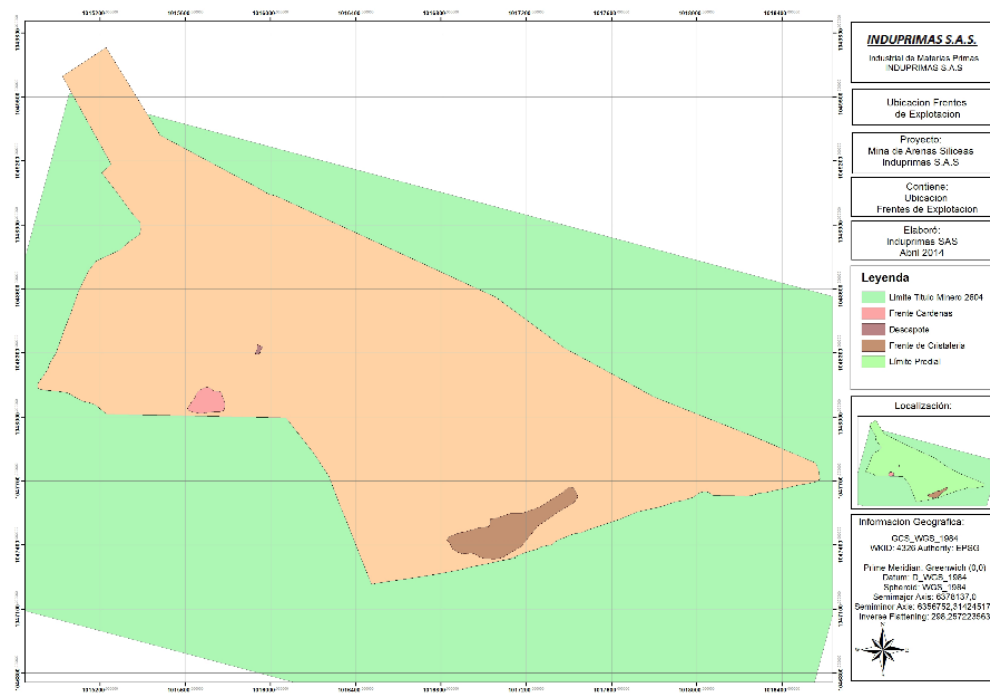


Figura 9. Mapa con ubicación de Frente Cárdenas, Cristalería y Tajo-02 en el área del título minero 2406.

### 7.1 Síntesis geológico-estructural

#### • Estructuras

El área se encuentra sobre las arenas que conforman la parte alta del anticlinal de Nemocón, la cual es una estructura deformacional, que indica un régimen tectónico compresivo. Por esta razón se presentan distintas fracturas en el cuerpo litológico (p.e. diaclasas abiertas o cerradas, rellenas o vacías, paralelas al eje o perpendiculares). Nuestro interés se basó en las diaclasas abiertas con relleno de arcilla, las cuales se encuentran paralelas al eje del pliegue con abertura perpendicular como se explica en la figura 10, ya que en dichas zonas se encontraron los principales problemas debido a la infiltración de aguas ricas en óxidos de



hierro, provenientes de las aguas meteóricas que han lavado las areniscas de la Formación Labor-Tierna. Estas aguas depositan arcillas férricas a lo largo de dichas fracturas y en los contactos entre de las rocas más competentes y las que no lo son.

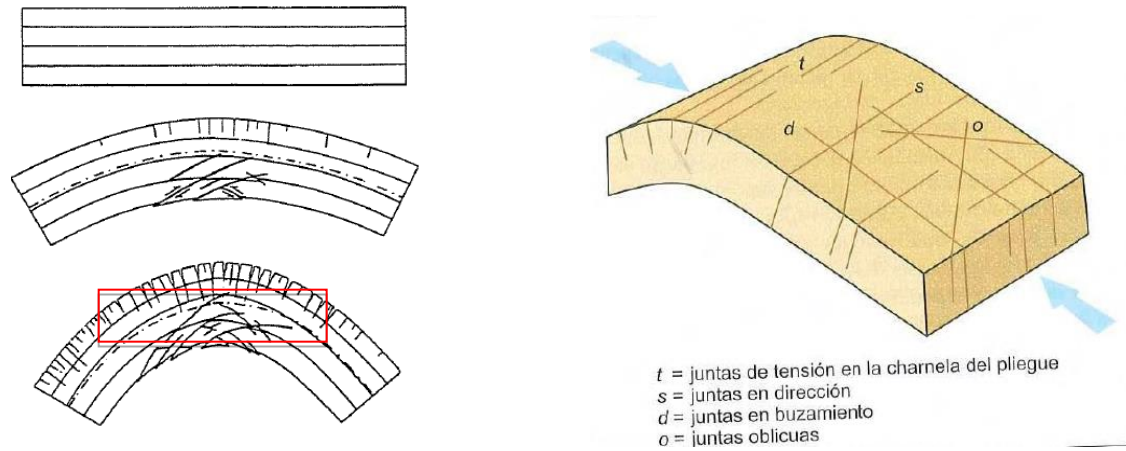


Figura 10. Esquema de deformación de un anticlinal con la formación de diaclasas en la zona de distensión. (George & Stephen, 1996) (Gonzales L. , 2002)

El área de estudio, adicionalmente está bajo la influencia de la falla de Nemocón, la cual presenta movimiento inverso, evidenciando el régimen compresivo. El escarpe de falla que se encuentra dentro del título minero (Ver Figura 11 b), podría estar asociado a lo que se ha llamado como la falla El Tunal, la cual presenta una dirección similar a la falla de Nemocón (figura 11 a).

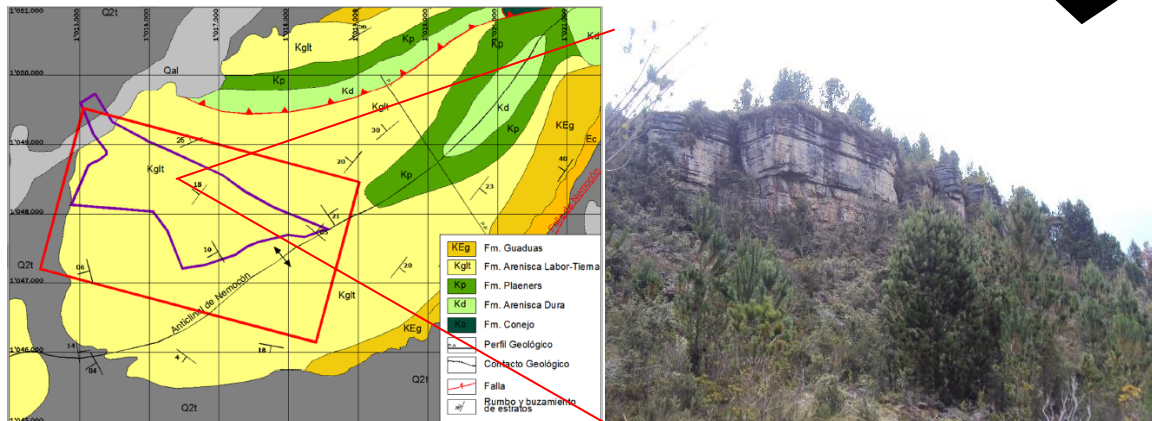


Figura 11. A) Mapa geológico generalizado B) Escarpe de falla. (Induprimas, 2012)

### • Diaclasas

Los sistemas de diaclasas en el área de estudio, fueron cartografiadas y medidas, se tuvo en cuenta que la orientación media de una familia se evalúa mediante la proyección estereográfica o la construcción de diagramas de rosas con los datos de las orientaciones medidas para cada discontinuidad. (Gonzales L. , 2002), basándonos en esto se realizó la

toma de datos en los distintos frentes y se graficaron en diagramas de rosas que se muestran a continuación.

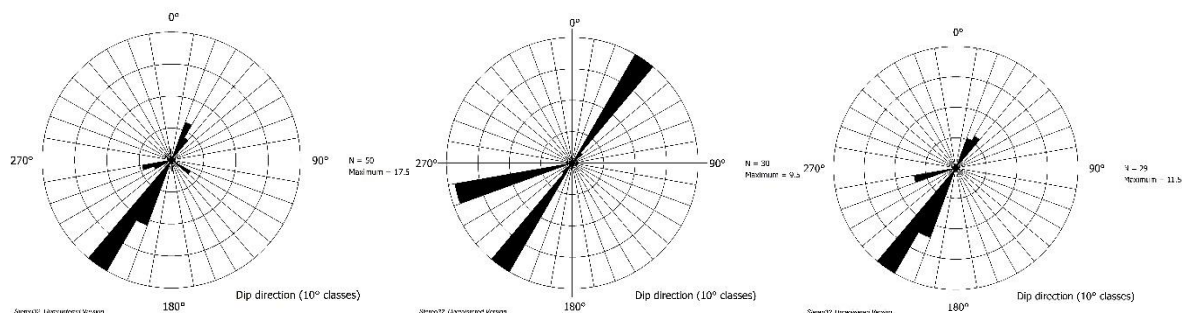


Figura 12. Diagramas de rosas de los distintos frentes de explotación.

Como se observa en la Figura 12, el régimen estructural del área es muy homogéneo evidenciado en los diagramas de rosas que nos muestran una dirección dominante similar a las estructuras regionales principales como lo es el eje del anticlinal y la falla Nemocón y más local como la falla El Tunal.

Para hacer el análisis de la intensidad o grado de fracturamiento del macizo rocoso, se utilizó la tabla 2, la cual clasifica el macizo rocoso dado por el número de familias de discontinuidades o diaclasas y por el espaciamiento de cada familia, cada una queda caracterizada por su orientación en el espacio.

| tipo de macizo rocoso | Número de familias                                      |
|-----------------------|---|
| I                     | masivo, discontinuidades ocasionales                    |
| II                    | una familia de discontinuidades                         |
| III                   | una familia de discontinuidades más otras ocasionales   |
| IV                    | dos familias de discontinuidades                        |
| V                     | dos familias de discontinuidades más otras ocasionales  |
| VI                    | tres familias de discontinuidades                       |
| VII                   | tres familias de discontinuidades más otras ocasionales |
| VIII                  | cuatro o más familias de discontinuidades               |
| IX                    | Brechificado  |

Tabla 2. Clasificación de diaclasas según el número de familias (Gonzales L. , 2002)

Teniendo en cuenta la clasificación anterior los frentes de explotación corresponden a macizos rocosos tipo III, IV, V, VI y VII, este último con poca ocurrencia, indicando que en general el área presenta un diaclasamiento con una dirección homogénea y continua según la clasificación de Gonzales L (2002). Lo que permite delimitar fácilmente bloques en los frentes de explotación y así evitar las áreas que presentan alto contenido férrico (Figura 13).

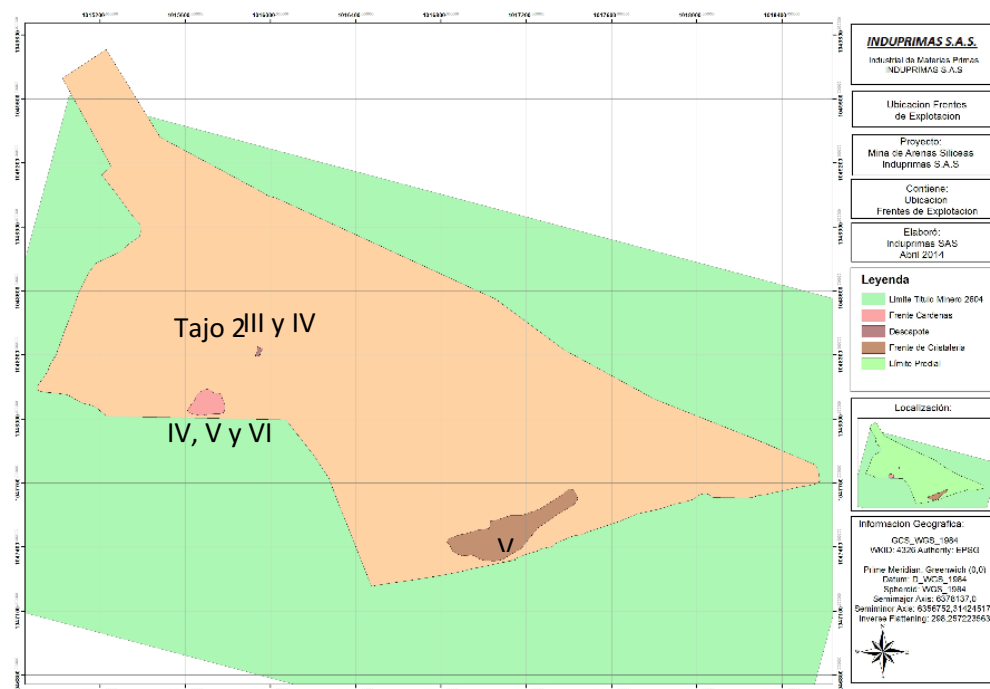


Figura 13. Mapa con ubicación y clasificación del macizo rocoso según Gonzales L (2002).

El comportamiento y continuidad de las diaclasas en los diferentes frentes, se pueden clasificar como de alta continuidad a muy alta continuidad (Ver Tabla 3), confirmando la homogeneidad en las estructuras del área y la facilidad de ser cartografiadas.

| Continuidad          | Longitud |
|----------------------|----------|
| Muy baja continuidad | < 1m     |
| Baja continuidad     | 1-3m     |
| Continuidad media    | 3-10m    |
| Alta continuidad     | 10-20m   |
| Muy alta continuidad | >20m     |

Tabla 3. Descripción de la continuidad (Gonzales L. , 2002)

- **Definición de bloques estructurales para la toma de muestras**

Los siguientes mapas (Figuras 14-17), sintetizan la información estructural de cada frente. De acuerdo a nuestro análisis, sólo el Tajo-02 (ver Figura 13), fue escogido para los análisis más específicos de granulometría, geoquímica y mineralogía, ya que este lugar presentaba rocas aflorando de color blanco pudiendo ser de buena calidad y por los datos estructurales homogéneos que permitieron delimitar los bloques, potencializando este lugar como sitio de explotación a largo plazo.

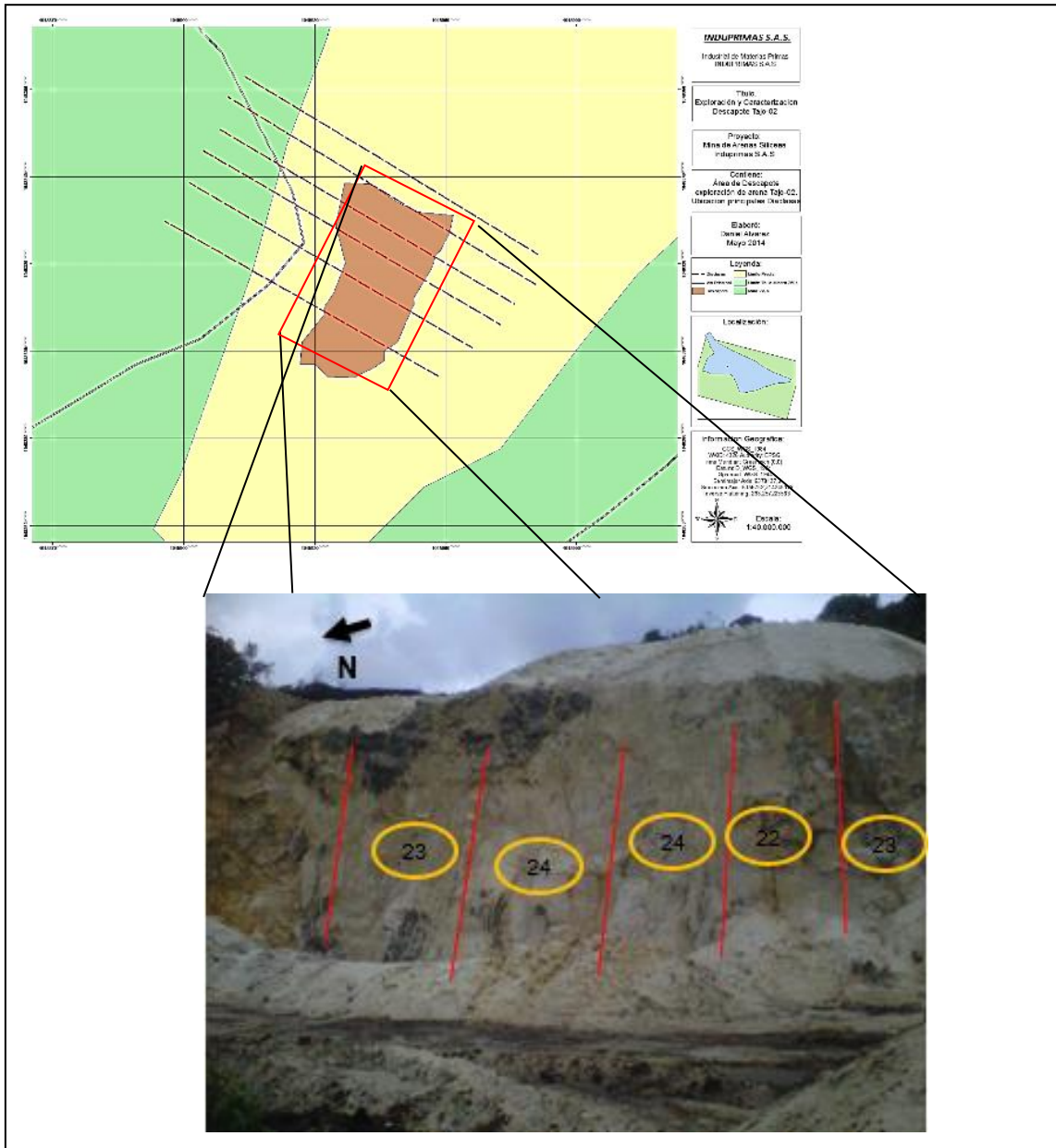


Figura 14. A) Mapa con cartografía de las principales diaclasas. B) Tajo-02 con la definición de bloques y valores de contenido férrico.





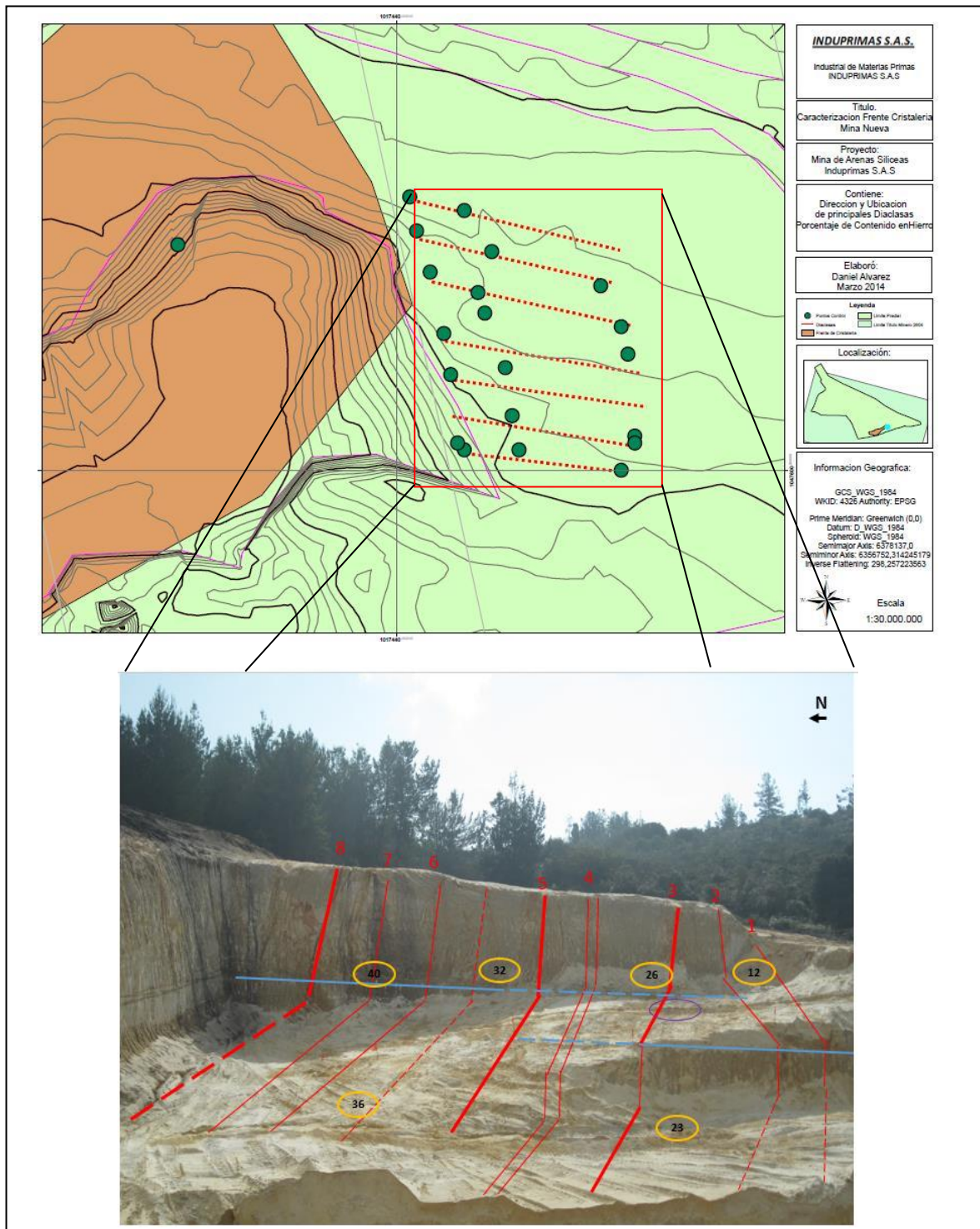


Figura 16. A) Mapa con cartografía de las principales diaclasas. B) frente Mina Nueva con la definición de bloques y valores de contenido férrico.



La actualización de la cartografía se realizó en los frentes Cárdenas, Mina Nueva y Tajo-02, los cuales permitieron identificar las principales estructuras y litologías, el frente Cárdenas, al estar activo, en explotación, con movimiento de arenas no permitió realizar un esquema con valores férricos ya que está en constante cambio. Los frentes de cristalería y Tajo-02 al ser frentes inactivos permitieron recolectar las muestras necesarias para realizar el análisis geoquímico.

## 7.2 Síntesis granulométrica

Como se mencionó anteriormente en el lugar conocido como Tajo-02 se realizó la toma de una muestra de 12kg que es sometida en el laboratorio a los mismos pasos secuenciales que siguen el proceso de beneficio industrial antes de usarlas como materia prima para la elaboración de vidrio.

Los datos granulométricos indican que la malla 50 y 100 son las que mayor porcentaje de material retenido presentan (Ver tabla 3), cada malla es sometida al análisis de contenido de hierro para ponderar el resultado y saber el porcentaje que aporta cada tamaño a la muestra total, la malla -140 es la que más porcentaje de contaminación de hierro posee.

| MALLA | PESO (gr) | PESO ACUMULADO | %    | % ACUMULADO | % HIERRO | Ponderado   |       |
|-------|-----------|----------------|------|-------------|----------|-------------|-------|
| 20    | 0         | 0              | 0    | 0           | 0        | 0           | 0,0%  |
| 30    | 40,5      | 41             | 0,3  | 0,3         | 0,04     | 0,000135    | 0,6%  |
| 40    | 4,2       | 45             | 0,0  | 0,4         | 0        | 0           | 0,0%  |
| 50    | 4314      | 4359           | 36,0 | 36,3        | 0,024    | 0,008628    | 35,3% |
| 100   | 7376      | 11735          | 61,5 | 97,8        | 0,024    | 0,014752    | 60,4% |
| 140   | 247       | 11982          | 2,1  | 99,8        | 0,037    | 0,000761583 | 3,1%  |
| -140  | 21        | 12003          | 0,2  | 100,0       | 0,087    | 0,00015225  | 0,6%  |
|       | 12003     | 40163          | 100  | 335         | 0        | 0,0244      |       |

Tabla 4. Resultados granulométricos de la muestra después de ser sometida a tamizaje



### 7.3 Síntesis geoquímica y Granulométrica

Se realizó la separación de minerales densos a las mallas que más contenido de hierro aportaron a la muestra total, por medio de la solución química Tetrabromoetano la cual tiene una densidad específica de 2,95g/cm, permitiendo que los minerales mayores a esta densidad decanten al fondo del recipiente, mientras los que presentan menor densidad flotan en el fluido. A continuación, en la tabla 5 se muestran los minerales identificados en las arenas con su respectiva densidad específica.

| Gravedad Especifica de Minerales en la Arena de la Mina el Tunal |   |      |
|--|---|------|
| Mineral  | Formula Química   | G.E. |
| Cuarzo   | SiO <sub>2</sub>  | 2,65 |
| Turmalina  | (Na, Ca)(Al, Fe, Li)(Al, Mg,Mn) <sub>6</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> ). (OH, F) <sub>4</sub> . | 2,98 |
| Anatasa  | TiO <sub>2</sub>  | 3,8  |
| Circón   | ZrSiO <sub>4</sub>  | 4,5  |
| Rutilo   | TiO <sub>2</sub>  | 4,25 |
| Caolín   | Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>  | 2,6  |
| Magnetita  | Fe <sup>2+</sup> (Fe <sup>3+</sup> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>  | 5,2  |
| Ilmenita   | Fe <sup>2+</sup> Ti <sup>4+</sup> O <sub>3</sub>  | 4,7  |
| Hematita   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 4,9  |
| Limonita   | FeO(OH)·nH <sub>2</sub> O   | 3,6  |

Tabla 5. Minerales identificados con su respectiva densidad específica (Dana, 1855)

Después de realizarse la separación por medio del medio denso se hace un reconocimiento de minerales por medio de un montaje de granos donde se observa que el mineral más abundante es el cuarzo posiblemente por mala separación a la hora de extraer los minerales densos de la solución química, sin embargo los minerales que más se presentan y contaminan son la hematita, ilmenita y anatasa (Figura 17).

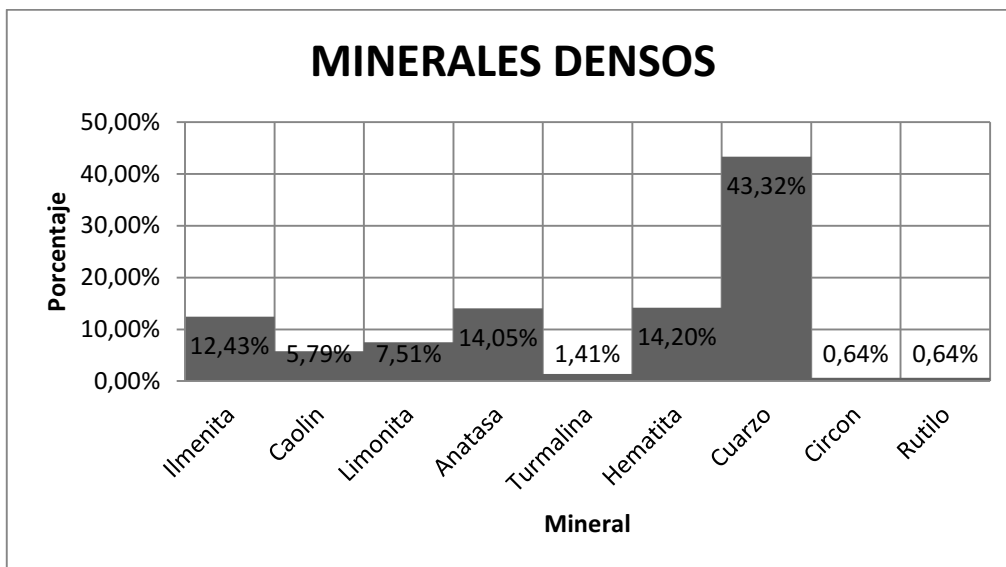


Figura 17. Indica que los principales minerales contaminantes son la ilmenita y la hematita.

Finalmente se realiza un análisis férrico de control para observar la diferencia que genera el separar los minerales contaminantes y se encontró que es posible disminuir el contenido en hierro de las arenas en un  $0.05 \pm 2\%$

| Prueba de Densidad en Tetrabromoetano por Mallas |                        |         |          |       |       |         |
|--|------------------------|---------|----------|-------|-------|---------|
| Malla  | Peso (gr)              |         |          |       | % FeO |         |
|  | Material en suspension | Densos  | Perdida  | ToTal | Antes | Despues |
| -140   | 7                      | 2,1     | 0,4      | 9,5   | 0,087 | 0       |
| 100  | 147                    | 0,01166 | 52,98834 | 200   | 0,024 | 0,021   |
| 50   | 150                    | 0,0908  | 49,9092  | 200   | 0,024 | 0,018   |

Tabla 6. Resultados posteriores a la separación por medios densos.

## 8. DISCUSION

Como se ha venido mencionando previamente, el principal factor para la producción de vidrios es la calidad de la materia prima, es por esto que se hace necesario mantener un control geoquímico y mineralógico sobre los contaminantes que se presentan sobre las mismas. En nuestro caso se trata de las características geoquímicas de las arenas silíceas que se extraen en el título 2604. Para poder entender de donde proviene la contaminación férrica que afecta la pureza de las arenas, se realizaron distintas visitas a campo para la toma de datos sistemáticos que permitieron comprender la disposición de las arenas y sus posibles contaminantes; así se logró determinar que el régimen estructural del área es el factor más contribuyente, siendo las diaclasas y su geometría los principales aportantes.

Comparado con otros sistemas análogos, la zona de estudio se puede explicar mediante un esquema de deformación de un anticlinal con la formación de diaclasas en la zona de distensión (González L. , 2002). Teniendo en cuenta la clasificación de los frentes de explotación, estos corresponden a macizos rocosos tipo III, IV, V, VI y VII, este último con poca ocurrencia, indicando que en general el área presenta un diaclasamiento con una dirección homogénea y continua según la clasificación de Gonzales L (2002). Lo que permite delimitar con claridad bloques en los frentes de explotación y así evitar las áreas que presentan alto contenido férrico.

De acuerdo con las necesidades de la industria, solo se pueden mejorar los procesos extractivos a partir del análisis detallado de la geología estructural en los frentes de explotación, ya que en general, la información secundaria existente en el área, y con la cual se han desarrollado las labores mineras ha sido obtenida por estudios a escalas regionales, la cual abarca grandes áreas y no especifica las características locales. Teniendo en cuenta el modelo actual, se zonificaron los frentes de explotación de Mina Nueva y Tajo-02 mediante la identificación de bloques estructurales (Figuras 14-16), delimitados por las diaclasas con relleno férrico. Los bloques delimitados, fueron caracterizados mineralógica y geoquímicamente con el fin de encontrar los principales minerales férricos, lo que permitió plantear cual es la mejor forma de explotación, siendo el avance paralelo a la dirección de las diaclasas; lo que mostro una notoria mejoría en cuanto a la calidad, concluyendo así que este es el mejor método a corto plazo para el aprovechamiento de las arenas silíceas.

Para aumentar el beneficio en las arenas, también se propone implementar nuevos equipos que permitan mejorar la calidad de estas extrayendo los minerales férricos contaminantes. Por medio de equipos que no manipulan químicos, esto, debido al compromiso ambiental de la industria minera y por la necesidad de obtener vidrios transparentes, ya que para su uso en botellas y cristalería esta es la característica más importante.

A continuación se muestran los minerales pesados contaminantes los cuales se muestran en la Tabla 7 (Fernández-Navarro, 2003), y que deben ser retirados de las arenas ya que su

disolución en la masa fundida causan problemas en la mayoría de los casos, permaneciendo como defecto en los productos finales.

| Mineral    | Formula  |
|------------|--|
| Anfíboles  | metasilicatos con grupos OH y F  |
| Arizonita  | $(\text{TiO}_3) \text{Fe}_2$   |
| casiterita | $\text{SnO}_2$   |
| circón     | $\text{SiO}_4\text{Zr}$  |
| corindón   | $\text{Al}_2\text{O}_3$  |
| cromita    | $\text{Cr}_2\text{O}_4 (\text{FeMg})$  |
| distena    | $\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$  |
| epidota    | $\text{Ca}_2(\text{Fe,Al})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$        |
| espinela   | $\text{MgO, Al}_2\text{O}_3$   |
| goethita   | $\text{FeO.OH}$  |
| ilmenita   | $\text{FeO.TiO}_2$   |
| magnetita  | $\text{FeO, Fe}_2\text{O}_3$   |
| olivino    | $\text{MgO, FeO, SiO}_2$   |
| pirita     | $\text{S}_2\text{Fe}$  |
| piroxenos  | Metasilicatos de elementos $\text{M}^2$  |
| rutilo     | $\text{TiO}_2$   |
| titanita   | $\text{CaO, TiO}_2, \text{SiO}_2$  |
| topacio    | $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F, OH})_2$  |
| turmalina  | $\text{NaF}_3(\text{AlF})_6(\text{OH})_4/(\text{BO}_3)/\text{Si}_6\text{O}_{18}$ |
| zoisita    | $\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$                      |

Tabla 7. Minerales pesados contaminantes de arenas usadas en la fabricación de vidrio (Fernandez Navarro, 2003).

El análisis de la calidad de las arenas, es de vital importancia para determinar el tipo de impurezas, por ejemplo si se detecta la presencia de cromita y la presencia simultánea de  $\text{TiO}_2$  o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e incluso ilmenita, (Rincon, 2005), estos deben ser retirados de las arenas en el proceso de lavado y secado, con el fin de optimizar el proceso de fusión y un mejor control de la viscosidad durante la operación de moldeado, con objeto de mejorar la calidad del vidrio (transparencia, homogeneidad) y desaparecer al máximo posible los defectos (burbujas, piedras) y también para aumentar la vida útil de los materiales refractarios del horno (Rincon, 2005). Como se observó en el análisis de contenido férrico, las arenas que se sometieron al proceso de separación de minerales densos por medio del químico Tetrabromoetano disminuyeron las impurezas en  $0.05 \pm 2 \%$ , permitiendo así que una arena clasificada como de tipo común, después de pasar por un proceso de separación de métodos densos, pueda ser reclasificada como arena para cristalería, obteniendo así un mayor beneficio en cuanto a calidad y costos.

Finalmente, el presente trabajo permitió proponer las siguientes conclusiones:

## 9. CONCLUSIONES

Realizadas las visitas a campo a los distintos frentes se concluyó que el régimen estructural dominante en el área es N65W, esto permitió identificar que el principal proceso de contaminación está asociado a la lixiviación por aguas superficiales que depositan los minerales férricos en las diaclasas que presentan abertura, convirtiendo estos espacios en relleno de arcillas altamente contaminantes para la industria.

Caracterizar estructuralmente los distintos frentes permitió comprender el comportamiento geométrico de las diaclasas rellenas de arcillas férricas y así evitarlas en el proceso de extracción.

La variación respecto al contenido de hierro no solo se debe a la contaminación que generan las aguas al depositarse en las diaclasas, en partes donde las fracturas son nulas y las arenas blancas también se presentan arenas con alto porcentaje de hierro debido a su mineralogía que contiene minerales como Magnetita, Ilmenita y Hematita.

El avance de los antiguos frentes de explotación se dio en la dirección preferencial de diaclasamiento siendo esta una de las razones por las cuales la arena que se extrajo mantuvo la calidad necesaria.

Caracterizar los distintos frentes de extracción de arena para cristalería permite definir distintos bloques con valores férricos y así llevar un control en la dirección de desarrollo de los frentes y de la calidad del material.

Retirar los minerales contaminantes en el método aplicado de medio denso, evidencia una mejoría en cuanto la calidad de las arenas, permitiendo que aquellas clasificadas como arena común, en algunos casos, puedan ser clasificadas como arenas para cristalería generando un mayor beneficio en cuanto a calidad y economía.

## 10. RECOMENDACIONES

Es necesario llevar un registro de las diaclasas en los distintos frentes de explotación con estudios de perforaciones inclinadas que unifiquen la distribución espacial de las diaclasas y la variación vertical del contenido férrico.

Los principales minerales férricos que se encuentran son la hematita y la ilmenita, los cuales pueden ser separados por medios densos. Se recomienda utilizar métodos físicos como el mecanismo del espiral que permite la separación de estos.

Para evitar la contaminación por arcillas férricas en las arenas se recomienda avanzar paralelamente a las diaclasas, si se presenta un problema paisajístico tratar de implementar procesos en los cuales se pueda evitar la combinación de arenas con dichas arcillas.

Para profundizar más en la caracterización mineralógica y en el paleoambiente depositacional se deben hacer estudios de sedimentología.

En la fase de exploración para los nuevos frentes de explotación, en este caso Tajo-02 es necesario hacer una malla de perforaciones que permita construir un mapa de isovalores para saber cómo se comporta el contenido férrico en profundidad y definir cuáles son los lugares con mayor potencial minero para la extracción de arena para cristalería.

Incorporación de nuevos equipos en el proceso de lavado que permitan eliminar los minerales contaminantes.

## 11 BIBLIOGRAFIA

- Alvarez, M. (1985). *Prospección Geológica con Taladro Rotatorio de Diamante, Yacimiento siliceo Zipaquira*. Bogota.
- Dana, J. (1855). *Manual de Mineralogia*. Barcelona: Reverte SA.
- Fernandez Navarro, J. (2003). *El Vidrio*. Madrid: CSIC (Textos Universitarios).
- George, D., & Stephen, R. (1996). *Structural Geology of rocks and regions*. New York: JOHN WILEY & SONS, INC.
- Gonzales, J. (2002). *agregados*. mEDELLIN: EAFit.
- Gonzales, L. (2002). *Ingenieria Geologica*. Madrid: Pearson Educacion.
- Induprimas. (2012). *Plan de trabajo y obras para - Título minero 2604*. Bogotá: Induprimas.
- Montoya, D. M., & Reyes, G. A. (2003). *Geología de la plancha 209 Zipaquirá*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Montoya, D. M., & Reyes, G. A. (2005). *Geología de la Sabana de Bogotá*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Perez, G., & Salazar, A. (1978). *Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe*. Bogota: U. Nal.
- Posada, J. (1995). *Caracterización de un yacimiento de arena silicéa para cristalería ubicado en el area de concesion 2604 de la compañía PELDAR S.A.* Zipaquira: Induprimas.
- Rincon, J. M. (2005). *Materias primas para la industria del vidrio*. España: Instituto E. Torroja de Ciencias de la Construcción,.